

Análise probabilística da estabilidade de obras em solo grampeado considerando a relação entre q_s e N_{SPT}

Lucas Bellini Machado

Graduando, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, lucasbellini27@gmail.com

Jean Rodrigo Garcia

Professor Adjunto, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

RESUMO: Analisa-se neste trabalho o comportamento do talude de uma escavação reforçada em solo grampeado, a partir da estimativa da tensão de aderência solo-grampo pelo N_{SPT} do solo, levando em consideração o seu coeficiente de variação apresentado pela literatura. O talude verificado para o dimensionamento possui 10 m de altura resultante de uma escavação vertical, em um solo silto argiloso de N_{SPT} médio igual a 13 golpes. Os parâmetros geotécnicos empregados nas análises foram estimados a partir de correlações existentes na literatura em função do tipo de solo estudado. Para tanto, foram analisados grampos injetados, com 15° de inclinação, 100 mm de diâmetro de perfuração e barras de aço CA-50 de 20 mm de diâmetro. As análises foram realizadas pelo método do equilíbrio limite e tensão-deformação, com o uso dos softwares *Slide 2018* e *RS2* (Rocscience), respectivamente. Empregou-se análise estatística do software, que permite obter a probabilidade de falha (PF), fator de segurança médio (FS) e índice de confiabilidade (β) para os casos analisados. Os resultados das análises demonstraram que a estimativa de q_s a partir de correlações com o valor de N_{SPT} podem implicar em variações significativas do fator de segurança da estabilidade geral e dos deslocamento horizontais. Portanto, é ressaltada a impotência do ensaio de arrancamento para validação do q_s de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Grampeado, Aderência, Estabilidade, Análise Numérica.

1 Introdução

A expansão populacional traz consigo um aumento da ocupação do solo, portanto é necessário o avanço de técnicas de engenharia para promoção de uma maior velocidade de construção, estabilidade de obras urbanas e escavações que podem promover interações indesejáveis com áreas já ocupadas no entorno. O uso de grampos no solo, técnica que resulta em uma maior estabilidade do maciço, tem sido amplamente empregada no mundo para contenção de taludes e túneis, apresentando desempenho elevado e maior rapidez no processo construtivo. Esta técnica é denominada de solo grampeado.

O processo consiste na inserção de grampos: barras de aço envolvidas com calda de cimento que atuam como reforço no maciço em corte a ser estabilizado. Após a aplicação dos grampos é utilizado concreto projetado para a confecção de um paramento e deve-se adicionar sistemas de drenagem à estrutura. A técnica proporciona um maior aproveitamento do espaço além de diminuir os custos com escavações (FRANÇA, 2007)

A tensão de aderência solo-grampo (q_s), associada ao atrito mobilizado no contato entre grampo e solo circundante, é um fator de característica importante para a determinação da estabilidade de um talude em solo grampeado, é função das propriedades do solo do grampo e da interface solo-grampo (SCHLOSSER ; UNTERREINER, 1990). Os métodos de cálculo desse fator são dependentes do valor de N_{SPT} que pode sofrer variações estatísticas.

Neste trabalho, dimensiona-se em solo grampeado um talude resultante de uma escavação de 10 m de altura, com características geotécnicas uniformes silto argilosas, N_{SPT} médio de 13 golpes e grampos de 20 mm de diâmetro e 15° de inclinação com a horizontal. Os valores de q_s variaram de acordo com as estatísticas de variabilidade intrínseca aos resultados de N_{SPT} citadas na literatura e pelos diferentes métodos de cálculo empregados para obtenção dos valores da tensão de aderência. Utilizou-se os seguintes métodos de cálculo para estimativa de q_s : Bustamante e Doix (1985), Ortigão e Sayão (1997), Ortigão (1997), Springer (2006).

As análises foram realizadas por meio dos softwares *Slide 2018* e *RS2* da *Rocscience*. Foram apresentados os resultados para três tipos diferentes de superfícies de ruptura e a análise global para superfície circular. Através da análise estatística é possível a determinação dos seguintes valores: probabilidade de falha (PF), fator de segurança (FS), índice de confiabilidade (RI) e deslocamento horizontais na face da contenção para todos os casos analisados.

2 Análises em solo grampeado

2.1 Superfícies Potenciais de Ruptura

Foram analisadas quatro tipos de superfícies de ruptura: 0,3 H, 0,4 H, cunha e global. As superfícies locais estipuladas para análise são as consideradas críticas em uma escavação urbana de solo grampeado (Figura 1). As superfícies 0,3 H e 0,4 H têm sua ruptura iniciada a 3 m e 4 m, no talude analisado de 10 m de altura, horizontalmente da ponta da escavação. A superfície cunha tem seu escorregamento a partir da base do talude, orientando-se à $45^\circ + \phi/2$, onde ϕ é o ângulo de atrito do solo.

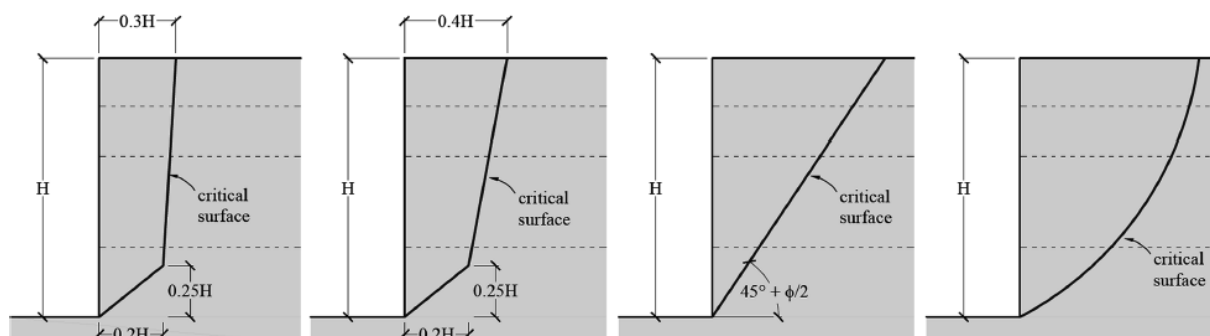


Figura 1. Superfícies de ruptura analisadas. (GARCIA *et al*, 2019).

2.2 Tensão de Aderência Solo-grampo

A tensão solo-grampo (q_s) é um dos parâmetros mais importantes se tratando de estruturas de solo grampeado, representando o atrito presente na interface circular solo-grampo. O valor é estipulado por correlações utilizando-se o valor do N_{SPT} . Bustamante e Doix (1985) apresentaram gráficos de correlações para determinação de q_s para areias (Figura 2) e argilas (Figura 3) obtidos através de ensaios com pressiómetro de Ménard. Dependendo dos diferentes métodos utilizados os valores de q_s serão diferentes, sendo que neste trabalho foram adotadas quatro referências de cálculo a partir de Lima (2007) (Tabela 1). O valor da tensão solo-grampo é obtido experimentalmente pelo ensaio de arrancamento.

Referência	Correlação
Ortigão (1997)	$q_s = 50 + 7,5 \cdot N_{spt}$
Ortigão e Sayão (1997)	$q_s = 67 + 60 \cdot \ln(N_{spt})$
Bustamante e Doix (1985)	Figura 2 e 3
Springer (2006)	$q_s = 45,12 \cdot \ln(N_{spt}) - 14,99$

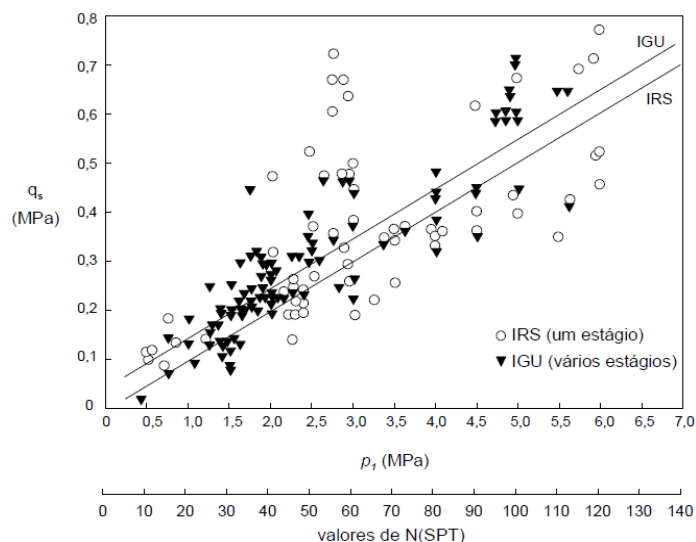


Figura 2. Correlação para areias (BUSTAMANTE ; DOIX, 1985).

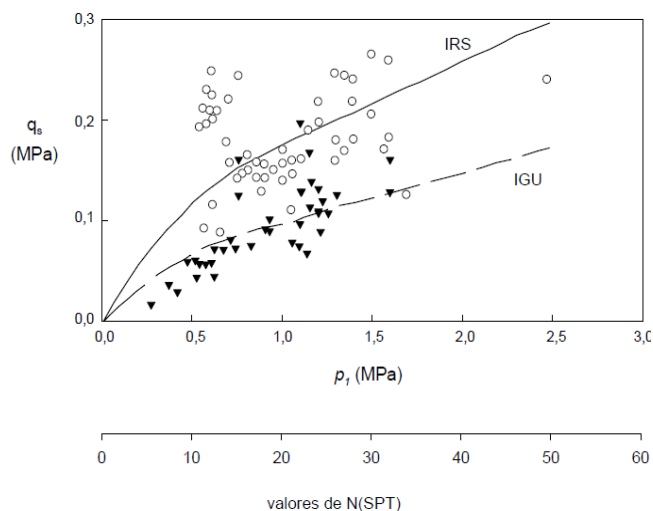


Figura 3. Correlação para argilas (BUSTAMANTE ; DOIX, 1985).

O valor da tensão de aderência utilizado nas análises ainda foi minorado pelo fator de segurança F.S. de 2 (Garcia *et al*, 2019) e conforme estabelece NBR 6122:2010.

$$q_{s(adm)} = \frac{q_s}{FS} (FS \geq 2) \quad (1)$$

2.3 Fator de Segurança

A determinação das análises de estabilização da escavação são realizadas através de dois tipos de fatores de segurança (F.S.), podendo ser probabilístico ou determinístico. O fator probabilístico é obtido pela média dos F.S. calculados pela variação dos parâmetros para a superfície de deslizamento Mínimo Global. O fator determinístico, análise convencional, é calculado pela superfície de deslizamento mínimo global, onde os fatores de cálculo são exatamente iguais aos valores médios.

2.4 Análise Probabilística

Os valores estimados não necessariamente são constantes, mesmo por ensaios laboratoriais e *in situ*, para toda a extensão do solo analisado, podendo haver variações a poucos metros do local da amostra. Para Budhu (2008) as decisões são tomadas pela experiência, porém é importante quantificarmos as incertezas para trazer uma maior confiabilidade do cliente ao *design* elaborado pelo projetista.

Neste trabalho será variado o q_s dos grampos à partir do coeficiente de variação (C_v) (Equação 2) do N_{spt} estabelecido do solo por Budhu (2008), aplicando o maior deles para casos mais críticos. Segundo o autor o N_{spt} tem coeficiente de variação entre 15 e 45%, portanto será adotado 45%.

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2)$$

Em que σ é o desvio padrão e \bar{X} é a média dos valores.

2.4.1 Tipos de análise

A análise foi realizada pelo Mínimo Global, localizando-se a superfície global mínima determinística (análise convencional), e a probabilística é aplicada apenas nesta superfície. O fator de segurança será calculado N vezes (onde N é o número de amostras) para a superfície mínima global de deslizamento, usando um diferente conjunto de variáveis de entrada gerada aleatoriamente para cada análise.

2.4.2 Probabilidade de Falha e Índice de confiabilidade

A probabilidade de falha (PF) indica quantas superfícies, dentre todas as analisadas, apresentam fator de segurança menor que 1, ou seja, não tem significado físico pois com o fator igual a 1 a ruptura já acontece.

A probabilidade de falha é expressa em porcentagem (Equação 3).

$$PF(\%) = \frac{N_{ruptura}}{N_{análises}} \times 100 \quad (3)$$

O Índice de confiabilidade (β) é um fator normalmente usado para se avaliar a estabilidade do talude após a análise probabilística (GARCIA *et al*, 2018). O índice pode ser calculado assumindo uma distribuição normal (Equação 4) ou lognormal (Equação 5), sendo o mesmo um indicador do número de desvios padrão que separam o FS médio do FS crítico, valor equivalente a 1 em que ocorre a ruptura.

$$\beta_n = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (4)$$

Em que μ_{FS} média do fator de segurança e σ_{FS} é o desvio padrão do fator de segurança.

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[\frac{\mu_{FS}}{\sqrt{1+V^2}} \right]}{\sqrt{\ln(1+V^2)}} \quad (5)$$

Em que V é o coeficiente de variação do fator de segurança ($= \sigma/\mu$).

3 Materiais e Métodos

Os parâmetros geotécnicos do solo foram adotados a partir de uma sondagem simples. Uma das camadas, silte argilosa de N_{SPT} 13, foi escolhida para a homogeneização de todo o maciço. Através da tabela estabelecida por Joppert Jr. (2007) e correlações com o N_{SPT} da camada adotada propostas por Teixeira e Godoy (2016) foram estimados os parâmetros geotécnicos (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros do solo adotado.

Características	Solo Silte Argiloso
γ (kN/m ³)	19
c (kPa)	20
ϕ (°)	31,1
E (MPa)	16,25
v	0,4

Os grampos possuem diâmetro de 100 mm, utilizando uma barra de aço CA-50 de diâmetro nominal de 20 mm. O comprimento dos grampos é constante ao longo do maciço de 8 m adotando-se a relação de $L=0,8H$ para grampos perfurados (Clouterre, 1991). Foi adotado espaçamento vertical entre grampos de 1,4 m e inclinação de 15° com a vertical, resultando em 7 grampos no plano de corte do aterro.

O paramento em concreto projetado tem espessura de 15 cm, usando as características isotrópicas do material para análise de estabilidade.

A configuração geométrica e espaçamento de grampos estão dentro das recomendações da FHWA NHI 14-007 (2015) (Figura 5).

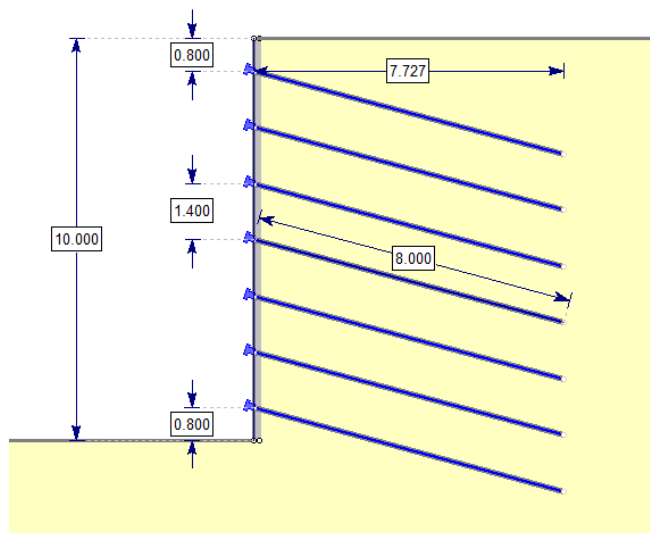


Figura 5. Características geométricas analisadas.

4 Resultados

4.1 Análise do talude sem os grampos

Foi elaborada uma análise preliminar do talude de 10 m com N_{SPT} de 13 golpes, sem a colocação dos grampos, e assim obtendo os fatores de segurança do maciço para as 4 superfícies analisadas. A superfície com menor FS foi a cunha com 0,910, ou seja, sem significado físico (instável) (Figuras 6).

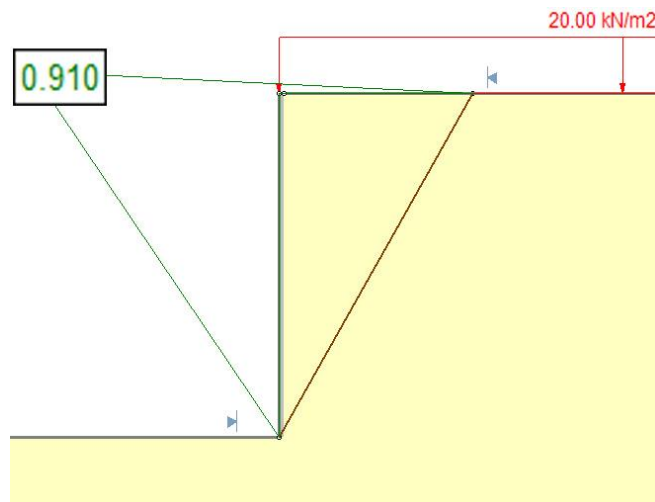


Figura 6. Análise do FS para a superfície de cunha, com talude sem grampos.

4.2 Análise do desvio de valor de q_s

Usando-se o valor de 45% para o coeficiente de variação é calculado um desvio padrão de 5,85 golpes em um N_{SPT} de 13 golpes. Portanto, foi calculado o valor do desvio para a tensão de aderência solo-grampo unitária (t) (Equação 6) para $13 \pm 5,85$ golpes utilizando os 4 métodos de correlação entre N_{SPT} e q_s (Tabela 3).

$$t = \frac{q_{sadm} \times \pi}{d_{furo}} \quad (6)$$

Tabela 3. Cálculo dos desvios para aderência solo-grampo unitária.

N _{SPT}	Ortigão e Sayão (1997)		Ortigão (1997)		Bustamante e Doix (1985)		Springer (2006)	
	t [kN/m]	Desvio	t [kN/m]	Desvio	t [kN/m]	Desvio	t [kN/m]	Desvio
18,85	38,20	3,50	30,06	6,89	26,70	4,71	36,58	0,68
13,00	34,70	-	23,17	-	21,99	-	35,90	-
7,15	29,06	5,63	16,28	6,89	14,14	7,85	34,64	1,26

Os desvios foram diferentes em alguns casos pelo fato de as correlações utilizarem o logaritmo neperiano em suas formulações, o que proporciona desvios não lineares. Foram adotados os maiores desvios para análise.

4.3 Análises de estabilidade

Os valores de desvio foram adotados como parâmetros de entrada para a ferramenta *Statistic* do software *Slide 2018*. Assim, foram feitas as análises para cada método de correlação utilizando as três superfícies não-circulares de ruptura e a global circular. O fator de segurança foi determinado pelo *Ordinary* (Fellenius) (Tabela 4).

Tabela 4. Resultados oriundos nas análises de estabilidade pelo *Slide 2018*.

	FS		PF	β	β
	Deter.	Prob.	(%)	normal	logn.
Ortigão e Sayão (1997)					
0,3H	2,275	2,273	0,000	106,909	156,736
0,4H	2,210	2,201	0,000	40,973	59,235
Cunha	2,310	2,289	0,000	17,301	25,432
Global	2,136	2,129	0,000	15,587	22,198
Ortigão (1997)					
0,3H	2,247	2,163	0,000	6,505	9,309
0,4H	2,008	1,934	0,000	3,556	4,812
Cunha	1,945	1,887	0,400	2,899	3,862
Global	1,940	1,921	0,000	5,433	7,369
Bustamante e Doix (1985)					
0,3H	2,228	2,117	0,000	4,880	6,903
0,4H	2,071	1,979	0,000	3,719	5,087
Cunha	2,026	1,950	0,500	3,007	4,068
Global	1,913	1,888	0,000	4,274	5,738
Springer (2006)					
0,3H	2,275	2,275	0,000	6026630	8832351
0,4H	2,210	2,210	0,000	3095793	4482918
Cunha	2,318	2,319	0,000	135,304	200,075
Global	2,147	2,148	0,000	92,808	132,755

4.4 Análises de deslocamentos

Utilizando o software *RS2* da *Rocscience* foram definidos os deslocamentos horizontais de maciço para cada tipo de correlação (Figuras 7 e 8). As análises foram elaboradas pelo método dos elementos finitos. A malha adotada foi do tipo “Graded” com elementos triangulares de 6 nós e o tipo de análise para o grampo foi “*Swellex / Split-Sets*”.

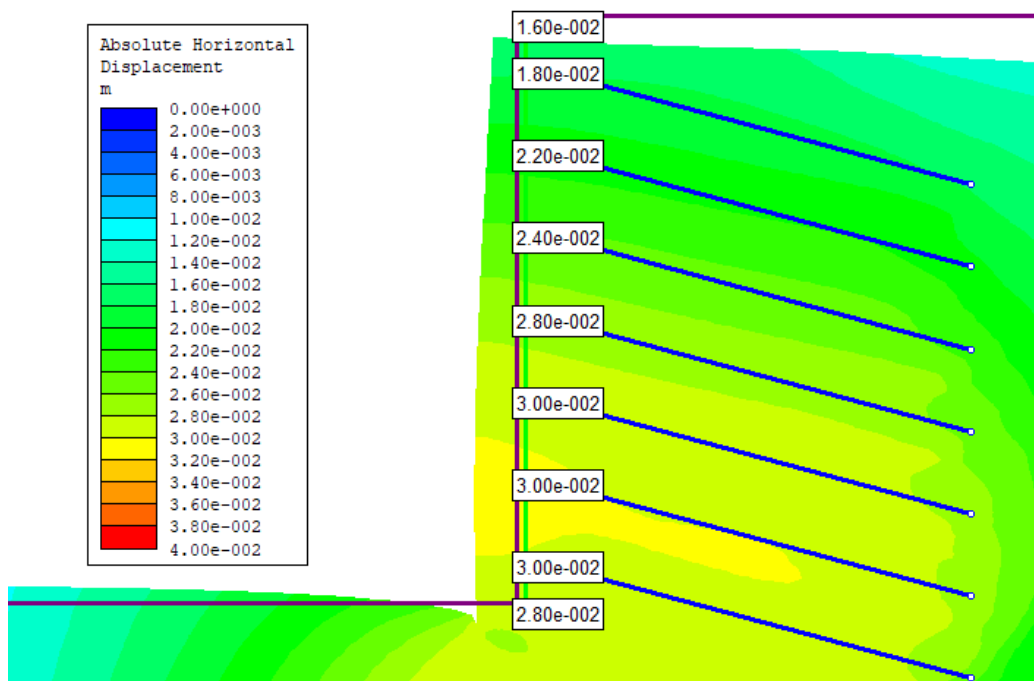


Figura 7. Análise de deslocamentos horizontais.

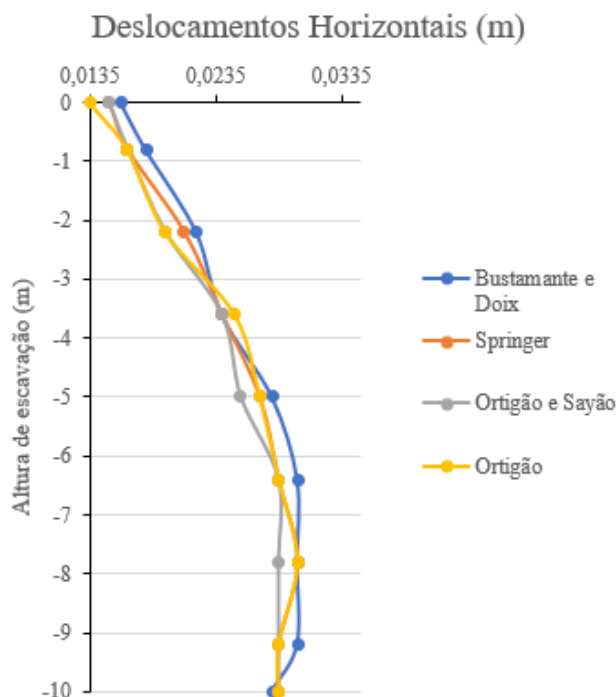


Figura 8. Comparação dos deslocamentos no perfil do talude por cada correlação.

5 Conclusão

Todas as correlações para o cálculo de tensão de aderência solo-grupo apresentam valores de FS tanto determinístico quanto probabilístico acima do valor estabelecido por norma ($FS = 1,5$) como seguro. Portanto, é possível afirmar que a estrutura analisada apresenta estabilidade apesar de haver grande variação entre os fatores obtidos por cada referência, encontrando-se um intervalo de 1,913 até 2,275 para FS determinístico e 1,887 até 2,289 para o FS probabilístico.

Apenas uma análise teve o índice de confiabilidade abaixo do mínimo ($\beta=3$) atrelado a 0,40% de probabilidade de falha. Os fatores determinísticos foram quase que preponderantemente maiores que os probabilísticos no caso analisado, demonstrando a importância deste tipo de análise.

A técnica de solo grampeado fez com que o fator de segurança aumentasse consideravelmente. Assim, com a aplicação da técnica é possível obter uma escavação urbana de 10 m em solo silte argiloso (N_{SPT} de 13 golpes) estável. A aplicação do coeficiente de variação máximo da literatura para a sondagem à percussão fez com que houvesse uma redução no valor do FS significativa, ressaltando a importância de ensaios de arrancamento para obtenção do valor da tensão de aderência.

A partir do Eurocode 7 (2004) é possível determinar o deslocamento máximo para o topo e base do talude de $0,002 H$ e $0,005 H$ respectivamente em solos densos, portanto 2 cm e 5 cm no caso analisado. O deslocamento máximo de topo encontrado pela análise é de 1,6 cm e 3 cm para a base, estando dentro das condições impostas pela norma europeia. A análise não está presente em normas nacionais, por isso é necessário recorrer às normatizações europeias.

Nota-se que a partir das diferentes correlações para estimativa de q_c ocasionam diferentes deslocamentos aferidos no paramento da contenção. Logo, as diferentes referências de cálculo para a tensão de aderência solo-grampo não impactam apenas na estabilidade da contenção, mas também nas condições limites de deslocamento horizontais e verticais desta.

Os resultados demonstram a importância de se realizar análises investigativas para determinar a superfície crítica de ruptura e valor da tensão de aderência solo-grampo, utilizando de análises determinísticas e probabilísticas. O resultado probabilístico demonstrou ser mais crítico quando comparado ao método determinístico convencional de análise de estabilidade de contenções.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia pela aquisição da licença dos softwares utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Budhu, M. (2008). *Foundations and Earth Retaining Structures*. John Wiley & Sons, NY, 2008
- Bustamante, M., and Doix B. (1985). *Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés*. Bull. Liaison Labo. P. Et Ch., 140, nov-déc. 1985, Réf 3047.
- Clouterre. (1991). *Recommandations Clouterre 1991*. Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Presses de l'ENPC.
- Eurocode 7. (2004). *Geotechnical Design – part 1. General Rules*. Bruxelas: [s.n.].
- Federal Highway Administration. (2015). FHWA-NHI-14- 007 - *Geotechnical Engineering Circular No. 7 - Soil Nail Walls - Reference Manual*. Washington: Federal Highway Administration.
- França, F. A. N. (2007). *Ensaio de arrancamento em solo grampeado em laboratório*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- Garcia, J. R., Albuquerque, P. J. R., Mucheti, A. S. (2019). *Probabilistic and Deterministic Analysis of an Excavation Supported by Tiebacks and Nailing in Residual Soil of Gneiss*. Springer Nature Switzerland AG 2019. M. Badr and A. Lotfy (Eds.): GeoMEast 2018, SUCI, pp 31-41.
- Joppert Jr., Ivan. (2007). *Fundações E Contensões de Edifícios - Qualidade Total Na Gestão Do Projeto E Execução*. 1sted. São Paulo: Pini Ltda.
- Lima A. P. (2007). *Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss*, Tese de Doutorado, PUC-Rio, 2007, Rio de Janeiro, 431 p.



- Ortigão, J. A. R. Ensaio de arrancamento para projetos de solo grampeado, Nota técnica, Solos; Rochas, ABMS, 1997. v. 20:1, pp.39-43.
- Ortigão, J. A. R., and A. S. Sayao. (2004). *Handbook of Slope Stabilisation*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- Schlosser, F.; Unterreiner, P. *Soil nailing in France – Research and Practice, Proceeding of first international seminar on soil mechanics and foundation engineering of Iran, Iranian Geotechnical Society*, 1990. Iran, v. 2, pp. 436-468
- Springer, F. O. (2006). Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss, Tese de Doutorado, PUC-Rio, 2006. Rio de Janeiro, 310p.
- Teixeira, Alberto Henriques, e Nelson Silveira de Godoy. 2016. “Análise, Projeto E Execução de Fundações Rasas.” In *Fundações: Teoria E Prática*, edited by Waldemar Hachich, Frederico F. Falconi, José Luiz Saes, Régis G. Q. Frota, Celso S. Carvalho, and Sussumu Niyama, 2nded., 802. São Paulo: Pini Ltda View